

МГНОВЕННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Саблин О.И.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. Академика В. Лазаряна
Украина, 49010, Днепропетровск, ул. Акад. В. Лазаряна, 2, "ДИИТ", каф. "Теоретические основы электротехники"
тел. (056) 373-31-15, E-mail: dnuzt@diit.edu.ua

Розглянуті методи визначення миттєвих коефіцієнта потужності та коефіцієнта корисної дії електрорухомого складу постійного струму, оскільки нестационарні режими роботи його силових кіл потребують енергетичного аналізу у реальному масштабі часу з врахуванням стохастичної зміни напруги на струмоприймачі, тягового струму, а також швидкості руху та сили тяги.

Рассмотрены методы определения мгновенных коэффициента мощности и коэффициента полезного действия электроподвижного состава постоянного тока, поскольку нестационарные режимы работы его силовых цепей требуют энергетического анализа в реальном масштабе времени с учетом стохастического изменения напряжения на токоприемнике, тягового тока, а также скорости движения и силы тяги.

Основными энергетическими показателями электроподвижного состава (ЭПС) являются к.п.д. η и коэффициент мощности λ [1], причем традиционно последний используется лишь к ЭПС переменного тока, для которого сдвиг по фазе между основными гармониками тока и напряжения характеризует $\cos \varphi$, а коэффициентом мощности учитывают, кроме сдвига по фазе, также и влияние высших гармонических составляющих несинусоидального тока. Однако, в работе [2] обоснована необходимость применения такого показателя и к ЭПС постоянного тока, поскольку и этот вид ЭПС является нелинейной нестационарной нагрузкой, технологически искажающей форму напряжения на токоприемнике и тягового тока. Нелинейные электрические цепи подвижного состава электрического транспорта, имея название (по роду питающего напряжения) цепей постоянного тока, фактически являются нелинейными цепями переменного (изменяющегося) тока, а переменный случайный характер напряжения на токоприемнике $U(t)$ ЭПС постоянного тока и его тягового тока $I(t)$ обязывают в электропотреблении учитывать величину его коэффициента мощности.

ЭПС постоянного тока с этих позиций может быть представлен в виде нелинейной динамической электротехнической системы со случайным воздействием $U(t)$ и случайной реакцией $I(t)$ (рис. 1),

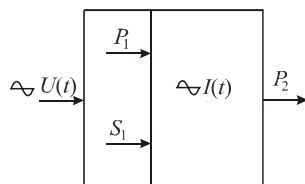


Рис. 1

согласно которой величина η определяется как отношение полезной (выходной) активной мощности P_2 к подведенной (входной) активной мощности P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Коэффициент мощности λ , согласно ДСТУ 2843-94 и ДСТУ 3121-95 [3, 4], для электрических

цепей с несинусоидальными $U(t)$ и $I(t)$ для рис. 1 определяют как отношение подведенной активной мощности P_1 , которая потребляется в конкретном режиме работы системы, к подведенной полной мощности S_1

$$\lambda = \frac{P_1}{S_1}. \quad (1)$$

Говоря о к.п.д. и коэффициенте мощности, всегда подразумевают их количественную меру, которая при установившемся режиме является величиной постоянной, поскольку определяют эти показатели по перечисленным выше мощностям, являющимися интегральными характеристиками.

ЭПС постоянного тока – нестационарный потребитель электроэнергии, большую часть времени работает в неустановившемся режиме, следовательно, в процессе работы ЭПС будут изменяться и потребляемая активная мощность и энергетические показатели. Таким образом, энергоэффективность работы ЭПС в эксплуатации невозможно в полной мере оценить с помощью интегральных показателей, а поэтому для оптимального энергорегулирования в таких системах необходимо также рассматривать энергетические показатели не только как неизменные величины, но и в режиме реального времени – как мгновенные функции, соответственно $\lambda(t)$ и $\eta(t)$. Однако в классической электротехнике не предусмотрено понятия мгновенного коэффициента мощности, поскольку он определяется для установившегося режима работы электрических цепей [5] и является величиной постоянной, а поэтому определим его исходя из интегрального выражения (1) в виде функции

$$\lambda(t) = \frac{P_1(t)}{S_1(t)}, \quad (2)$$

где $P_1(t)$ и $S_1(t)$ – мгновенные соответственно активная и полная (кажущаяся) мощности ЭПС.

Запишем интегральное выражение коэффициента мощности λ системы за произвольный период времени T ее работы через значения мгновенных функций тока и напряжения

$$\lambda = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t)dt}}, \quad (3)$$

где $U(t)$ и $I(t)$ на рассматриваемом участке времени T дискретизируем на N равных интервалов $\Delta T = T_{n+1} - T_n$, а в пределах интервала ΔT в свою очередь разделим $U(t)$ и $I(t)$ на M равных интервалов $\Delta t = t_{m+1} - t_m$ (рис.2), таким образом, получаем, что $T = N \Delta T$, а $\Delta T = M \Delta t$, при этом квантованные функции тока и напряжения содержат $N \cdot M$ точек.

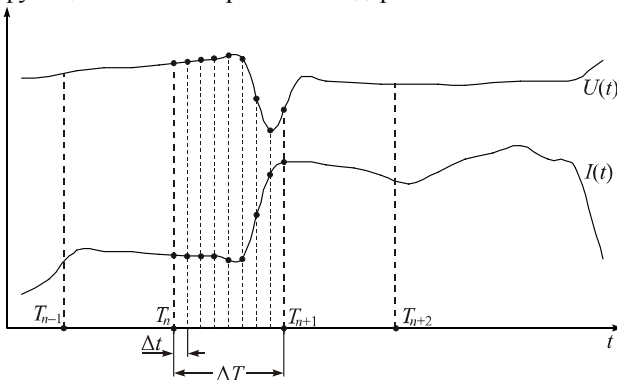


Рис. 2

Далее введем ранжированную переменную $n = 1, 2, \dots, N$, в результате получим возможность на N участках времени T определить N значений активной P_n и полной S_n мощностей по M значениям тока и напряжения, то есть через интервалы времени $T_n = \Delta T, 2\Delta T, \dots, N \Delta T$, а значит определим неизменные значения мощностей и соответственно коэффициент мощности в пределах каждого участка ΔT . Тогда для интервала времени ΔT на рис. 2 можно записать значение коэффициента мощности как интегральной величины в виде:

$$\lambda = \frac{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} U(t)I(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} U^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} I^2(t)dt}} \approx \frac{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M U_m I_m \Delta t}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M U_m^2 \Delta t} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M I_m^2 \Delta t}}, \quad (4)$$

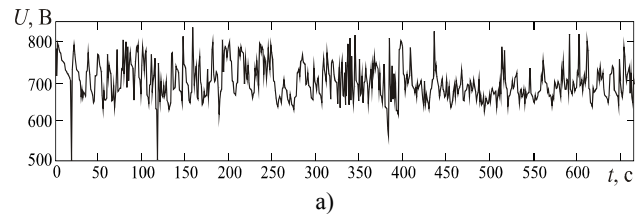
где в числителе приведена потребляемая ЭПС активная мощность на интервале времени ΔT , а в знаменателе – полная мощность за тот же интервал. Если взять предел выражения (4) при $\Delta T \rightarrow 0$ и $\Delta t \rightarrow 0$ (а соответственно $N \rightarrow \infty$ и $M \rightarrow \infty$), причем $\Delta t \ll \Delta T$, то есть величина Δt – малая более высокого порядка, чем ΔT (рис. 2), тогда (4) будет стремиться к значе-

нию λ в данный момент времени, то есть к мгновенной величине коэффициента мощности

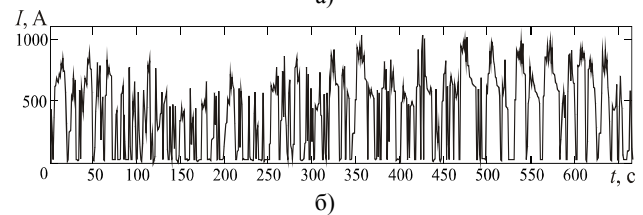
$$\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta T \rightarrow 0}} \frac{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M U_m I_m \Delta t}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M U_m^2 \Delta t} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M I_m^2 \Delta t}} \rightarrow \lambda(t). \quad (5)$$

Считая в пределах каждого из интервалов ΔT величины P , S и соответственно λ неизменными, можно рассмотреть как изменялись эти величины на других интервалах времени ΔT , т.е. получаем функции $P(t)$, $S(t)$ и в результате $\lambda(t)$.

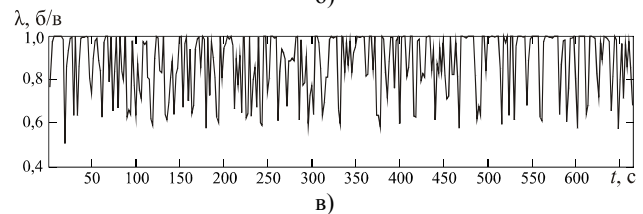
На рис. 3 представлены реализации напряжения на токоприемнике $U(t)$ (а) и тягового тока $I(t)$ (б) трамвая с реостатным регулированием напряжения на тяговых двигателях, и соответствующий им график мгновенного коэффициента мощности $\lambda(t)$ (в).



а)



б)



в)

Рис. 3

В силу случайности процессов $U(t)$ и $I(t)$ ЭПС постоянного тока, функция изменения $\lambda(t)$ также будет случайной. Из рис. 3 видно, что величина коэффициента мощности значительно снижается в те моменты, когда происходит резкое изменение потребляемого тока (нарастание или убывание), т.е. в моменты искажения формы тягового тока и соответственно напряжения на токоприемнике. Изменяясь в пределах $0,5 \dots 1,0$, среднее значение λ для рис. 3, определенное по (3), равняется $0,76$, что заметно ниже $1,0$. Низкие значения коэффициента мощности в первую очередь обусловлены искажениями формы тягового тока по отношению к форме приложенного напряжения, то есть технологическими факторами эксплуатации ЭПС.

Необходимо отметить, что полученный вид графика $\lambda(t)$ зависит, прежде всего, от шага дискретизации ΔT , так как в пределах этого интервала коэффициент мощности рассматривается как интегральная величина.

Величина к.п.д. ЭПС с позиций теории электрической тяги может быть определена интегральной характеристикой и для конкретного случая (режима, поездки) как отношение работы по перемещению поезда, совершаемой тяговыми двигателями (ТЭД) ЭПС за период тяги, к энергии, взятой из сети. Эта величина будет представлять собой средний к.п.д. и определяться по выражению [6]

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\int_0^S F(S) dS}{\int_0^t U(t)I(t) dt}, \quad (6)$$

где $F(S)$ – сила тяги ТЭД ЭПС; $U(t)$ и $I(t)$ – соответственно напряжение на токоприемнике и потребляемый ток ЭПС.

Интеграл, стоящий в числителе определяют по пути S и в пределах от начальной точки движения до конечной, а интеграл в знаменателе находят по времени от начального момента работы ТЭД до конечного.

Для упрощения интеграл в числителе выражения (6) можно преобразовать, введя зависимость пути от времени и изменив пределы интегрирования (т.е. перейдем от интегрирования по пути к интегрированию по времени), тогда (6) запишется в виде

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{S(t)} F(S(t)) dS(t)}{\int_0^t U(t)I(t) dt} = \frac{\int_0^t F(t)v(t) dt}{\int_0^t U(t)I(t) dt}, \quad (7)$$

где $v(t)$ – скорость движения ЭПС.

Если коэффициент мощности ЭПС постоянного тока в рассматриваемых конкретных его режимах работы при стохастических электрических величинах $U(t)$ и $I(t)$ полностью определяется реализациями этих величин, то для определения к.п.д. ЭПС в конкретном его режиме работы, кроме $U(t)$ и $I(t)$, согласно выражению (7), необходимо также знание функций изменения скорости $v(t)$ и силы тяги $F(t)$ ТЭД на ободу колес ЭПС. Как известно, $v(t)$ и $F(t)$ при работе ЭПС зависят от множества факторов и являются также как и напряжение на токоприемнике и тяговый ток – случайными функциями времени, но могут быть представлены реализациями для определенного режима работы.

По аналогии с мгновенным коэффициентом мощности введем понятие мгновенного к.п.д., в общем виде определяемого выражением

$$\eta(t) = \frac{W_{a.n}(t)}{W_a(t)}, \quad (8)$$

где $W_a(t)$ и $W_{a.n}(t)$ – соответственно мгновенные активные потребляемая и выделяемая (полезная) энергии ЭПС.

При известном виде реализаций $U(t)$, $I(t)$, $F(t)$ и $v(t)$ мгновенный к.п.д. ЭПС определится согласно (8) в виде:

$$\eta(t) = \frac{F(t)v(t)dt}{U(t)I(t)dt} = \frac{F(t)v(t)}{U(t)I(t)}, \quad (9)$$

то есть $\eta(t)$ представляет собой отношение мгновенной реализуемой ЭПС на ободу колес механической мощности по перемещению поезда (полезной) к мгновенной электрической мощности, потребляемой из сети. При случайном характере изменения функций $U(t)$, $I(t)$, $F(t)$ и $v(t)$ функция $\eta(t)$ будет также случайной.

На рис. 4 по реализациям $U(t)$, $I(t)$, $F(t)$ и $v(t)$ для одного из режимов работы электровоза ВЛ8 на одном из участков Приднепровской железной дороги определена реализация мгновенного к.п.д. полученная по (9).

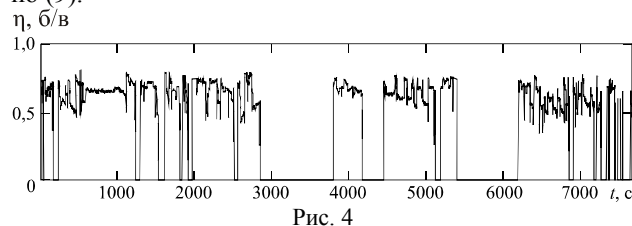


Рис. 4

Средний к.п.д. за поездку для рис. 4, определенный по (7) составил 0,778. При управлении ЭПС машинистом, к.п.д. принимает значения, находящиеся в пределах 0,5...0,8 (рис. 4), т.е. величина к.п.д. определяется уже не конструктивными параметрами самого ЭПС, а режимом управления, который выбирается машинистом в зависимости от его опыта, графика движения а также других условий, которые, по сути, являются неопределенными.

Таким образом, в результате рассмотренных методов определения мгновенных энергетических показателей – к.п.д. и коэффициента мощности – получили, что в реальных стохастических условиях эксплуатации ЭПС постоянного тока эти показатели значительно снижаются и зависят в большей степени от стохастических факторов, например режима управления ЭПС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Осипов С.И. Основы электрической и тепловой тяги. – М.: Транспорт, 1985. – 334 с.
- [2] Костин Н.А., Саблин О.И. Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока // Электротехника і Електромеханіка, 2005'1, №1. – С. 97-100.
- [3] ДСТУ 2843–94 Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 20 с.
- [4] ДСТУ 3120–95 Електротехніка. Літерні позначення основних величин. – К.: Держстандарт України, 1995. – 23 с.
- [5] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том первый – Л.: Энергоиздат, 1981. – 534 с.
- [6] Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

Поступила 30.08.2007